

طراحی کنترل کننده فازی برای کنترل وضعیت یک ربات پرنده چهار روتوره

حوری خدایاری^۱، فرشاد پازوکی^۲، علیرضا خدایاری^۳، علیرضا غیاث^۴

۱ دانشجوی دکتری مهندسی هوافضا، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، تهران

۲ استادیار گروه مهندسی هوافضا، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، تهران، pazooki_fa@srbiau.ac.ir

۳ استادیار گروه مهندسی هوافضا، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، تهران

۴ کارشناس ارشد مهندسی هوافضا، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۲/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۳/۲۰

چکیده

کنترل وضعیت پروازی ربات‌های پرنده دارای روتور، از جمله مسائلی است که در بهبود عملکرد این دسته از وسایل پرنده نقش مؤثری دارد. از جمله عوامل برهم‌زننده وضعیت ربات‌های پرنده روتوری می‌توان به اغتشاشاتی که در خلال پرواز در زوایای پروازی وسیله پرنده ایجاد می‌شود اشاره کرد. طی سالیان گذشته، یکی از راه‌های اصلاح و بهبود این مشکل، استفاده از کنترل‌کننده‌های گوناگون است. در این مقاله ابتدا گونه‌ای از ربات‌های پرنده روتوری با عنوان کوادروتورها معرفی می‌شوند. پس از مقایسه میان این نوع ربات پرنده و سایر وسایل پرنده و بررسی ساختار عملکردی آن، روند طراحی یک کنترل‌کننده فازی جهت کنترل وضعیت سیستم ربات ارائه می‌شود. در ادامه، شبیه‌سازی کوادروتور مورد نظر در نرم‌افزار متلب انجام و نتایج حاصل از این شبیه‌سازی بیان شده است. در پایان مشاهده می‌شود که کنترل کننده فازی طراحی شده ضمن مقاوم‌بودن در برابر تغییر پارامترهای سیستم قادر به از بین بردن اغتشاشات وارده بر وضعیت پرواز آن در بهترین و کوتاه‌ترین زمان ممکن است.

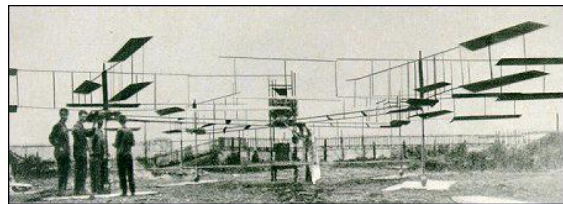
واژگان کلیدی: کنترل کننده فازی، ربات پرنده، شبیه‌سازی، کوادروتور، وضعیت پروازی

۱. مقدمه

طی سال‌های گذشته، ربات‌های پرنده یا هواپیماهای بدون سرنشین با توجه به حذف عامل انسانی، به عنوان وسایل پرنده با قابلیت‌ها و کاربردهای متنوع، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. از جمله انواع بسیار مهم و پرکاربرد هواپیماهای بدون سرنشین، بالگردهای بدون سرنشین هستند که با توجه به قدرت نشست و برخاست عمودی خود، بسیار مورد توجه قرار دارند. بالگردهای بدون سرنشین به دو دسته کلی بال ثابت و بال از نوع روتور

تقسیم می‌شوند. وسایل پرنده بدون سرنشین با بال‌های روتوری به دلیل دستیابی به درجات بالاتر آزادی، پرواز با سرعت پایین‌تر، پروازهای متعادل و قابلیت پرواز در محیط‌های بسته برتری قابل توجهی نسبت به سایر انواع دارند. ربات‌های پرنده چهار روتوره یا کوادروتورها گونه‌ای از هواپیماهای بدون سرنشین هستند که ساختاری مشابه ساختار دینامیکی و پروازی بالگردها دارند، در حالی که به جای استفاده از یک روتور متداول دارای چهار روتور

در چهار گوشه بدنه خود می‌باشند. وجود این چهار روتور قابلیت هایی را در سیستم جلوبرندگی وسیله پرنده از جمله قابلیت حمل بار بیشتر، قدرت مانورپذیری بالاتر، توانایی پرواز در محیط‌هایی با موانع زیاد و برخاست در محیط‌های کوچک را فراهم می‌سازد و پرواز این وسائل پرنده از طریق تغییر در سرعت هر یک از این چهار روتور تنظیم و کنترل می‌شود. نخستین طرح موفق از یک ربات پرنده چهار روتوره در سال ۱۹۰۷ م، توسط برادران بروگنی^۱ به بهره‌برداری رسید. در شکل ۱ نخستین کوادروتور ساخته‌شده نمایش داده شده است.



شکل ۱. کوادروتور ساخته‌شده توسط در سال ۱۹۰۷ م

در ابتدا مهمترین کاربرد انواع کوادروتورها مصارف نظامی بود، اما طی سال‌های متمادی این گروه از هواپیماهای بدون سرنشین برای کاربردهای صنعتی و بازرگانی نیز مورد استفاده قرار گرفتند. این کاربرد همچنین مصارف کشاورزی، کاربردهای زمین‌شناسی و یا عملیات نجات را دربر می‌گیرد. در حال حاضر مهمترین مراکز ساخت کوادروتورها مراکز علمی و دانشگاهی است که امروزه بیش از پیش به دنبال دستیابی به راه‌های گوناگون جهت ارتقای عملکرد و پرواز این دسته از وسائل پرنده هستند. به‌عنوان مثال، شکل ۲ کوادروتور ساخته‌شده توسط دانشگاه استنفورد آمریکا را نشان می‌دهد [۱].



شکل ۲. کوادروتور ساخته‌شده در دانشگاه استنفورد

یکی از مهمترین پارامترها در ارتباط با کوادروتورها توانایی کنترل پرواز این دسته از وسائل پرنده است. دینامیک این ربات

های پرنده شامل تعداد زیادی از پارامترهای غیرخطی است، از اینرو روش‌های کنترل خطی غالباً ناتوان از تحلیل و کنترل این سیستم‌ها هستند. تاکنون پژوهش‌های گوناگونی در راستای طراحی کنترل‌کننده‌ها، برای کنترل کوادروتورها انجام شده است که از آن جمله می‌توان به طراحی مدلی از یک سیستم همراه با موتورهای DC و با استفاده از معادلات غیرخطی لیاپانوف برای کنترل گردش کوادروتور توسط ماهونی اشاره کرد [۲]. بوعداله در پژوهش‌هایی جداگانه به مقایسه میان روش‌های کنترلی کلاسیک PD و PID و روش کنترلی مدرن LQ و یا کنترل بهینه تطبیقی بر سیستم یک ربات چهار روتوره پرداخته و همچنین روش‌های PID، LQR تطبیقی و روش لیاپانوف را برای کنترل وسیله پرنده با هم مقایسه کرده است [۳-۴]. استفاده از روش بازخوردی و نصب دوربین‌هایی روی بدنه ربات جهت تخمین همزمان پارامترهای پروازی توسط آلتاگ انجام شد [۵]. همچنین تریبوجی با استفاده از روش‌های کنترلی مدرن از جمله روش کنترل شبکه عصبی به کنترل سیستم کوادروتور پرداخت [۶]. در این مقاله نیز با در نظر گرفتن یک سیستم غیرخطی از دینامیک کوادروتورها به طراحی یک کنترل‌کننده فازی برای کنترل وضعیت آن در حضور یک اغتشاش دلخواه پرداخته شده است. این کنترل‌کننده یک سیستم نرمال‌شده با سه ورودی و دو خروجی است که با در نظر گرفتن پنج تابع عضویت مثلثی برای هر ورودی کنترل‌کننده و با توجه به دامنه تغییرات هر یک از آنها، ضمن دستیابی به دقت بالا، کاهش محاسبات استنتاجی را منجر شده است. در ادامه یک شبیه‌سازی جامع برای بررسی کنترل‌کننده طراحی شده، با استفاده از کد تابع نوشته‌شده انجام و در پایان نتایج حاصل از شبیه‌سازی بررسی شده است.

۲. ساختار دینامیکی کوادروتور

کوادروتورها به‌عنوان شاخه‌ای پیشرفته از هواپیماهای بدون سرنشین روتوری، با توجه به ساختار خود دارای برتری‌های قابل توجهی نسبت به سایر انواع وسائل پرنده هستند. در جدول ۱ مقایسه‌ای میان وسائل پرنده گوناگون و قابلیت‌های آنها آمده است. در این جدول برتری سیستم‌هایی همچون هلیکوپترها (سیستم‌هایی با قابلیت نشست و برخاست عمودی) و بالون‌های هوایی نسبت به سایر وسائل پرنده مشخص است. برتری این

وسیله پرنده است [۷]. همان گونه که مشاهده می شود، عملکرد سیستم های با قابلیت نشست و برخاست عمودی نسبت به سایر وسایل پرنده بیشتر است.

وسایل پرنده از جمله در قابلیت پرواز عمودی، قابلیت کنترل و نیز قابلیت در پرواز با سرعت پایین است. در این جدول هرچه عدد اختصاص داده شده بالاتر باشد، نشان دهنده عملکرد بهتر

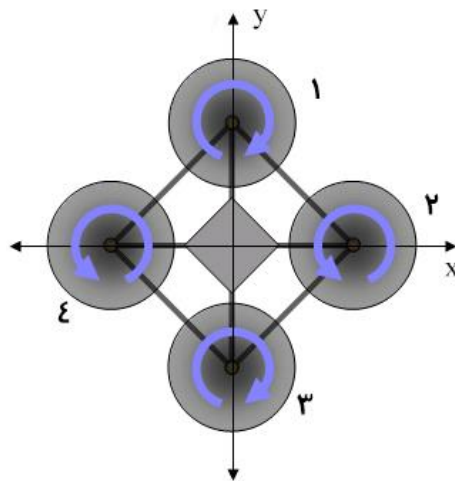
جدول ۱. مقایسه عملکرد وسایل پرنده گوناگون

بالون هوایی	اتوزایرو	پرنده	هلیکوپتر	هواپیما	
۳	۲	۱	۱	۲	توان
۳	۲	۱	۱	۲	قابلیت کنترل
۱	۲	۲	۲	۳	حجم بار قابل حمل
۱	۲	۳	۳	۲	مانورپذیری
۱	۲	۳	۳	۱	درجه آزادی
۳	۱	۲	۳	۱	پرواز متعادل
۳	۲	۲	۳	۱	پرواز با سرعت پایین
۳	۱	۲	۳	۱	قابلیت نشست و برخاست عمودی
۳	۱	۲	۳	۲	مداومت پروازی
۲	۱	۲	۳	۱	پرواز در محیط های بسته
۲۳	۱۶	۲۰	۲۵	۱۶	جمع

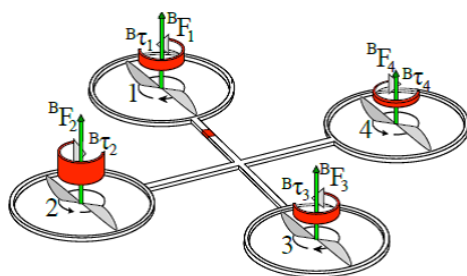
داده شده است. سرعت حرکت روتورهای مقابل هم از لحاظ کمی در حالت شناوری کوادروتور با یکدیگر برابر است و هر گونه اختلال در این برابری با توجه به شرایط منجر به ایجاد گشتاورهایی در خلال پرواز این پرنده می شود. با توجه به این نکته می توان گفت کوادروتور وسیله پرنده ای با ۶ درجه آزادی است که با توجه به ساختار آن با حل دینامیک کوادروتور برای ۴ حرکت پایه ای آن شامل پیشران دسته گاز، غلت، فراز و سمت می توان مشخصه های اساسی این ربات را تحت کنترل درآورد. شکل ۴ فرمان پیشران دسته گاز را برای ربات پرنده ۴ روتوره نمایش می دهد، همانطور که در شکل مشخص است این فرمان با افزایش و یا کاهش همزمان سرعت تمامی ملخ ها ایجاد می شود. این فرمان همچنین منجر به دستیابی به یک نیروی عمودی در سیستم بدنه ثابت می شود که کوادروتور را بالا و یا پایین می برد. در شکل ۵ نمایش حرکت غلت ربات چهار روتوره نمایش داده شده است. این فرمان با افزایش یا کاهش سرعت

حرکت یک کوادروتور با ایجاد یک برش جانبی به معنای در نظر گرفتن یک صفحه با ۴ روتور می توان به درستی مدل سازی می شود [۸]. هر پروانه توسط دنده هایی به موتور متصل است و تمامی محورهای دورانی پروانه ها به صورت موازی و نیز کاملاً ثابت شده قرار دارند. تیغه های موازی جریان هوایی روبه پایین را برای دستیابی به بیشینه برآ ایجاد می کنند. این ساختار حاکی از آن است که یک کوادروتور را به طور تقریبی می توان به صورت یک جسم صلب در نظر گرفت و نشان داد که مهمترین پارامتر در حرکت یک کوادروتور سرعت حرکت پره های روتور هاست. در ساختار برش خورده کوادروتور ملخ های جلو و عقب حرکت پادساعتگرد دارند، حال آنکه ملخ های جانبی به صورت ساعتگرد حرکت می کنند. این نوع حرکت نیاز به وجود یک روتور در انتهای بدنه وسیله پرنده - چنانچه در بیشتر بالگردهای متداول نیز دیده می شود - را از بین می برد. در شکل ۳ ساختار کلی کوادروتور در حالتی که سرعت چهار ملخ با هم برابر است نمایش

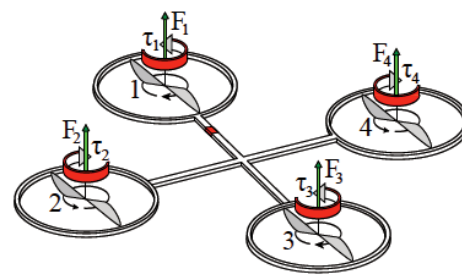
دو ملخ جانبی پدید می‌آید و به ایجاد یک گشتاور حول محور x منجر می‌شود و قدرت گردش پرنده را فراهم می‌کند.



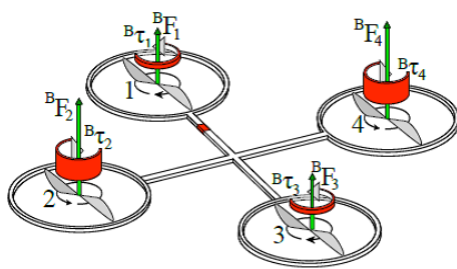
شکل ۳. نحوه حرکت ملخ‌های یک ربات چهار روتوره



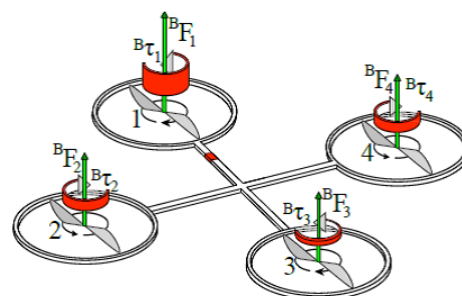
شکل ۵. حرکت غلت



شکل ۴. حرکت پیشران دسته‌گاز



شکل ۷. حرکت سمت



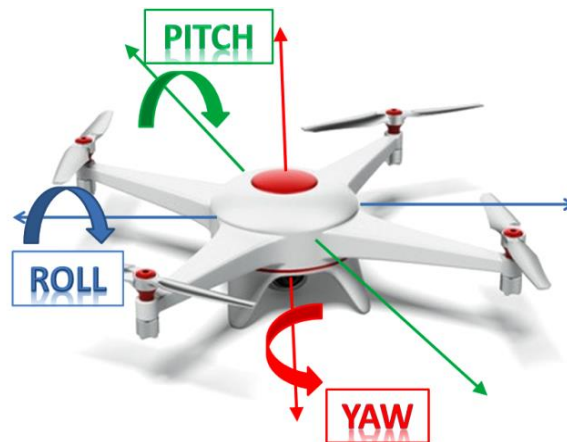
شکل ۶. حرکت فراز

جانبی کوادروتور ایجاد و منجر به ایجاد یک گشتاور حول محور z می‌شود که در نتیجه آن کوادروتور قادر به گردش خواهد بود. حرکت سمت با توجه به اینکه ملخ‌های جلو و عقب کوادروتور حرکت ساعتگرد و ملخ‌های جانبی حرکت پادساعتگرد دارند ایجاد می‌شود. مجموع این حرکات برای کوادروتور به صورت شکل ۸ نمایش داده می‌شود. معادلات حرکت ربات پرنده چهار روتوره به عنوان یک جسم صلب شامل ۱۲ معادله حرکت است

شکل ۶ حرکت فراز کوادروتور را نمایش می‌دهد. این فرمان بسیار مشابه فرمان قبل است، با این تفاوت که با افزایش یا کاهش سرعت در ملخ جلویی و عقبی (۲ و ۴) ایجاد منجر به ایجاد یک گشتاور حول محور y می‌شود که کوادروتور با استفاده از آن قادر به گردش خواهد شد. شکل ۷ نیز نمایش فرمان حرکت سمت برای ربات چهار روتوره است. این فرمان با افزایش یا کاهش سرعت ملخ‌های عقبی - جلویی و یا دو ملخ

که ۶ معادله از این ۱۲ معادله مربوط به سرعت و ۶ معادله دیگر مربوط به شتاب کوادروتور در خلال پرواز آن می‌شود. فرض‌های

در نظر گرفته شده در ارتباط با این کوادروتور که در این مقاله نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند، عبارت‌اند از:



شکل ۸ حرکات غلت، فراز و سمت کوادروتور

۱. کوادروتور در حالت شناور حول نقطه تعادل آن بررسی می‌شود

۲. پرواز کوادروتور در یک محیط بسته در نظر گرفته شده است

۳. در حالت شناوری شتاب وارده بر کوادروتور صفر است

۴. کوادروتور حول صفحات YZ و XZ متقارن است

۵. کوادروتور به‌عنوان جسم صلب در نظر گرفته شده است

۶. از آثار فلپ روتورها صرف‌نظر شده است

۷. همه موتورها یک ثابت زمانی دارند

معادلات حرکت با استفاده از روش نیوتن - اولر به‌دست می‌آیند [۹-۱۰].

با بررسی دینامیک حرکت ربات چهار روتوره و بررسی آثار نیروها و گشتاورهای مؤثر بر کوادروتور با در نظر گرفتن فرض‌های موجود می‌توان معادلات مربوط به شتاب‌های خطی و زاویه‌ای و همچنین رابطه میان سرعت روتورهای کوادروتور را به‌دست آورد. خصوصیات کوادروتور مورد استفاده در جدول ۲ ذکر شده است [۱۱]. پس از به‌دست آوردن مدل دینامیکی از کوادروتور انجام عملیات شبیه‌سازی بر روی این سیستم و طراحی و اعمال کنترل‌کننده ممکن خواهد بود.

۳. طراحی کنترل‌کننده فازی

سیستم‌های فازی برای نخستین‌بار در سال ۱۹۶۵ م توسط پروفیسور زاده معرفی شدند و پس از آن برای اولین‌بار در کنترل

سیستم موتور بخار در سال ۱۹۷۵ م توسط ممدانی و اصیلیان مورد استفاده قرار گرفتند [۱۲]. کنترل‌کننده فازی براساس منطقی و اندیشه انسان پایه‌ریزی می‌شود و سعی می‌کند رفتاری مشابه آنچه انسان خبره به‌هنگام کنترل یک سیستم انجام می‌دهد، نشان دهد. در واقع طراحی کنترل‌کننده فازی به‌معنای به‌دست آوردن مجموعه‌ای از قواعد اگر - آنگاه فازی با استفاده از دانش انسان خبره و دستورالعمل‌های موجود است. در طراحی یک کنترل‌کننده فازی نکته مهم دقت در انتخاب این قواعد و قوانین است که با در دست داشتن اطلاعات مربوط به رابطه میان ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم انجام می‌گیرد. در ارتباط با سیستم مورد نظر این مقاله، همان‌طور که پیش از این نیز اشاره شد، تلاش در از بین بردن اغتشاشات وارده بر حرکات بنیادی کوادروتور از اهمیت بسیار بالایی در خلال پرواز این پرنده برخوردار است. از اینرو، با توجه به قابلیت‌های بالای کنترل‌کننده فازی در کنترل سیستم‌های غیرخطی طراحی یک کنترل‌کننده فازی برای کنترل زوایای حرکتی ربات پرنده چهار روتوره مد نظر قرار می‌گیرد. کنترل‌کننده فازی طراحی‌شده برای سیستم ربات چهار روتوره نیز مانند سایر کنترل‌کننده‌های فازی شامل چهار قسمت است که عبارت‌اند از فازی‌ساز، پایگاه قواعد، موتور استنتاج و غیرفازی‌ساز. جهت طراحی کنترل‌کننده فازی از یک سیستم نرمال شده با سه ورودی و دو خروجی استفاده می‌شود که ورودی‌های سیستم عبارت‌اند از زوایای رول، پیچ و یاو

کوادروتور [۱۳]. توابع عضویت در کنترل کننده فازی طراحی شده به منظور دستیابی به پاسخ هموارتر و حداقل تعداد محاسبات در هر لحظه برابر پنج تابع عضویت مثلثی می باشد که برای ورودی زوایای پروازی به صورت LP و P و Z و N و LN هستند. همچنین جهت ساده تر شدن محاسبات حد اشباع برای عملگرها در انجام شبیه سازی عملیات مفروض در نظر گرفته شده است. خروجی های سیستم شامل سرعت روتورهای کوادروتور است که به جهت برابری سرعت روتورهای مقابل هم، که قبلاً نیز به آن اشاره شد، تعداد خروجی ها به دو خروجی تقلیل می یابد. توابع عضویت برای متغیرهای خروجی نیز به صورت XL و L و M و S و XS در نظر گرفته می شود.

جدول ۲. خصوصیات کوادروتور مورد استفاده

پارامتر	مقدار
وزن	۳۲۰ گرم
طول بلید	$10^{-3} \times 13/1$ نیوتن متر مربع بر دور مربع
ممان اینرسی در راستای محور x	۰/۰۰۳۲ کیلوگرم متر مربع
ممان اینرسی در راستای محور y	۰/۰۰۳۲ کیلوگرم متر مربع
ممان اینرسی در راستای محور z	۰/۰۰۱۸ کیلوگرم متر مربع
سرعت روتور	۴۷۴ دور بر دقیقه

در تنظیم قسمت فازی ساز این سیستم از روش مرکز سطح استفاده می شود و موتور استنتاج مورد استفاده نیز بر پایه روش ممدانی عمل می کند. قوانین مربوط به کنترل کننده طراحی شده باید به گونه ای طراحی شوند که بتوانند با تنظیم صحیح سرعت روتورها اغتشاشات ایجاد شده در وضعیت کوادروتور، که ناشی از ایجاد میزان ۰/۱ رادیان اغتشاش در زاویه رول است، را از بین ببرند. نمونه ای از قوانین استنتاجی برای سیستم مورد بررسی در حضور زوایای غلت و فراز کوادروتور و در حالت عدم حضور زاویه سمت در قالب جدول ۳ آورده شده است. توابع عضویت ورودی برای کنترل زوایای پروازی در شکل ۹ نمایش داده شده است. همچنین توابع عضویت خروجی های کنترل کننده نیز همانند قبل و به صورت شکل ۱۰ به دست خواهد آمد.

۴. شبیه سازی و بررسی نتایج

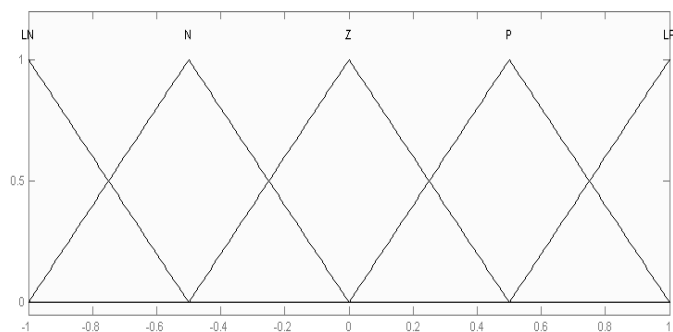
پرواز کوادروتور در کنترل وضعیت آن با استفاده از نرم افزار متلب شبیه سازی شده است. برای بررسی عملکرد کنترل کننده طراحی

شده برای کوادروتور، یک برنامه جامع شبیه سازی تدوین شده است. این برنامه پس از دریافت زمان لازم برای شبیه سازی، مقادیر مربوط به سرعت روتورها در جهت از بین بردن اغتشاش ایجاد شده در زاویه رل کوادروتور را تنظیم می کند. پس از شبیه سازی و با اعمال شرایط ورودی و اغتشاش مورد نظر بر سیستم ربات چهار روتوره بررسی عملکرد کنترل کننده طراحی شده در ارتباط با زوایای اصلی پروازی کوادروتور امکان پذیر است. پاسخ سیستم برای زاویه غلت کوادروتور مطابق شکل ۱۱ است.

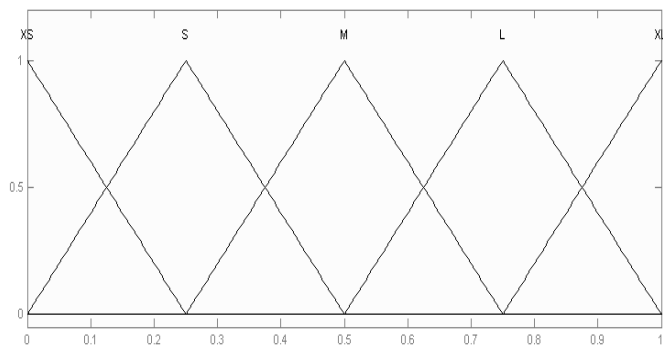
جدول ۳. قوانین استنتاجی کنترل کننده فازی

	LN	N	Z	P	LP
LN	XL	XL	XL	XL	L
N	XL	XL	XL	L	S
Z	XL	XL	L	S	M
P	XL	L	S	M	XS
LP	L	S	M	XS	XS

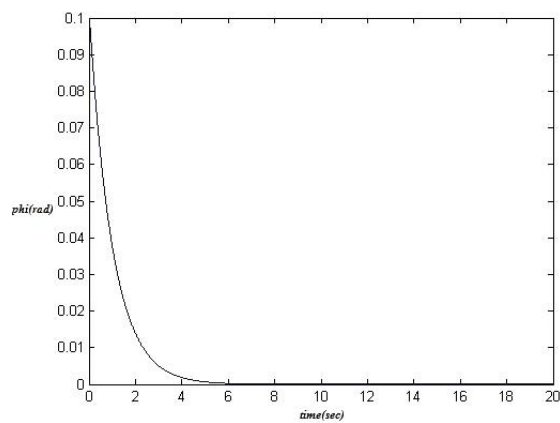
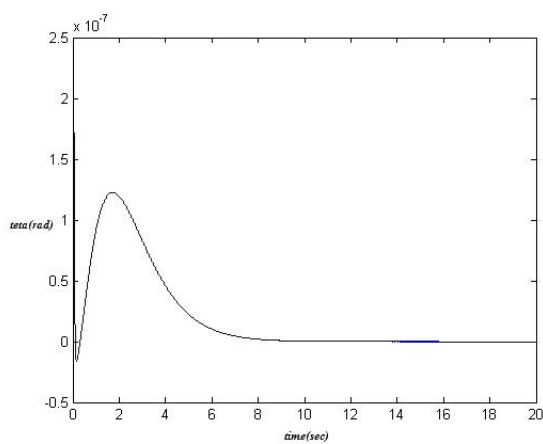
همان گونه که مشاهده می شود، کنترل کننده در حضور اغتشاشی به میزان ۰/۱ رادیان در زاویه اولر ϕ به کوادروتور اعمال شده است و پاسخ این سیستم برای کنترل این زاویه از سرعت بسیار بالایی برخوردار است و اغتشاش ایجاد شده به صورت هموار و بسیار مناسب از بین رفته است. کنترل زاویه فراز نتیجه اعمال کنترل کننده به صورت شکل ۱۲ است. همان طور که مشاهده می شود، میزان اغتشاش در ابتدای اعمال کنترل کننده با شیب نسبتاً زیادی روبه افزایش است، اما در مدت زمانی در حدود ۱۰ ثانیه پس از آغاز این اغتشاش به صورت کامل از بین می رود. در ارتباط با زاویه سمت کوادروتور نیز نتیجه حاصل از اعمال کنترل کننده فازی به صورت شکل ۱۳ است و این اغتشاش نیز با اعمال کنترل کننده با سرعت مناسبی خطای ایجاد شده روبه کاهش گذاشته و در مدت زمان حدود ۸ ثانیه پس از آغاز اغتشاش به صورت کامل از بین می رود.



شکل ۹. توابع عضویت فازی نرمال برای زوایای غلت، فراز و سمت کوادروتور

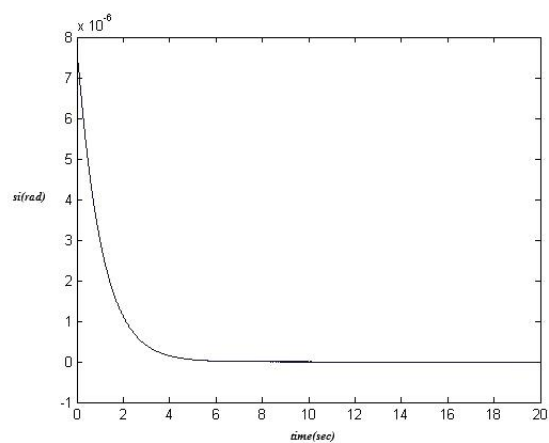


شکل ۱۰. توابع عضویت فازی نرمال برای ولتاژ موتورهای کوادروتور



شکل ۱۱. پاسخ سیستم برای تغییرات زاویه غلت با استفاده از کنترل کننده فازی

شکل ۱۲. پاسخ سیستم برای تغییرات زاویه غلت با استفاده از کنترل کننده فازی



شکل ۱۳. پاسخ سیستم برای تغییرات زاویه سمت با استفاده از کنترل کننده فازی

۵. نتیجه‌گیری

چهار روتوره در حضور یک اغتشاش دلخواه حول نقطه شناوری بالگرد به آن اعمال شد و نتایج حاصل از عملکرد کنترل‌کننده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که علاوه بر بهبود وضعیت کوادروتور در حضور کنترل‌کننده فازی، بهره‌برداری از آن می‌تواند خطاهای مربوط به پارامترهای گوناگون سیستم را به سمت صفر همگرا کند.

در این مقاله پس از بحث و معرفی شاخه‌ای پیشرفته از انواع بالگردها تحت عنوان کوادروتورها، استخراج یک مدل دینامیکی غیرخطی از این سیستم‌ها انجام و پس از آن روند طراحی کنترل‌کننده فازی با توجه به قابلیت این کنترل‌کننده در کنترل سیستم‌های غیرخطی برای این بالگرد تشریح شد. در ادامه، کنترل‌کننده طراحی‌شده جهت کنترل زوایای اصلی پروازی ربات

۶. مأخذ

- [1] Hoffmann, Gabriel M., Haomiao Huang, Steven L. Waslander, and Claire J. Tomlin. "Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment." In *Proc. of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, vol. 2, p. 4. 2007.
- [2] Pounds, Paul, Robert Mahony, Joel Gresham, Peter Corke, and Jonathan M. Roberts. "Towards dynamically-favourable quad-rotor aerial robots." In *Proceedings of the 2004 Australasian Conference on Robotics & Automation*. Australian Robotics & Automation Association, 2004.
- [3] Bouabdallah, Samir, Andre Noth, and Roland Siegwart. "PID vs LQ control techniques applied to an indoor micro quadrotor." In *Intelligent Robots and Systems, 2004. (IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on*, vol. 3, pp. 2451-2456. IEEE, 2004.
- [4] Bouabdallah, Samir. "Design and control of quadrotors with application to autonomous flying." PhD diss., Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2007.
- [5] Altug, Erdinc, James P. Ostrowski, and Robert Mahony. "Control of a quadrotor helicopter using visual feedback." In *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on*, vol. 1, pp. 72-77. IEEE, 2002.
- [6] Dunfied, J., M. Tarbouchi, and G. Labonte. "Neural network based control of a four rotor helicopter." In *Industrial Technology, 2004. IEEE ICIT'04. 2004 IEEE International Conference on*, vol. 3, pp. 1543-1548. IEEE, 2004.
- [7] Bouabdallah, Samir, Pierpaolo Murrieri, and Roland Siegwart. "Design and control of an indoor micro quadrotor." In *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on*, vol. 5, pp. 4393-4398. IEEE, 2004.
- [8] Bresciani, Tammaso. "Modelling, identification and control of a quadrotor helicopter." *MSc Theses* (2008).
- [9] Pounds, Paul, Robert Mahony, and Peter Corke. "Modelling and control of a quad-rotor robot." In *Proceedings Australasian Conference on Robotics and Automation 2006*. Australian Robotics and Automation Association Inc., 2006.
- [10] Goela, S., Gupta, A. "Modelling, Simulation and Flight Testing of an Autonomous Quadrotor." Department of Aeronautics and Astronautics, MIT, USA, 2009.
- [11] Kivrak, Arda Özgür. *Design of Control Systems for a Quadrotor Flight Vehicle Equipped with Internal Sensors*. Atılım Üniversitesi, 2006.

[۱۲] غفاری، ع. سیستم‌های دینامیکی و کنترل، تهران: دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۷۴.

[۱۳] خدایاری، ح. "طراحی سیستم کنترلی فازی بهینه با استفاده از روش رگولاتور مربعی خطی برای یک کوادروتور"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، ۱۳۹۲.

پی‌نوشت